

机械制造工艺优化与生产效能提升路径研究

王寿祥

深圳市华铭业科技有限公司 广东 深圳 518172

摘要：在全球制造业竞争格局深刻变革与新一轮科技革命加速演进的时代背景下，机械制造作为实体经济的基础，其核心竞争力日益取决于工艺水平与生产效能。本文聚焦于“机械制造工艺优化”这一核心命题，系统性地探讨了其在智能制造时代下的内涵、关键技术、实施路径与未来趋势。文章首先剖析了传统机械制造工艺面临的效率低下、成本高企、质量不稳等痛点，并阐述了工艺优化对于提升企业综合竞争力的战略意义。其次，深入研究了以数字化建模与仿真、精益生产理念、先进制造技术（如增材制造、复合加工）为代表的工艺优化关键技术体系。在此基础上，构建了一个涵盖“诊断分析—方案设计—实施监控—效果评估”的闭环式生产效能提升路径，并引入关键绩效指标（KPI）体系对优化效果进行量化衡量。最后，结合人工智能（AI）、数字孪生（Digital Twin）等前沿技术的发展，展望了机械制造工艺优化向自感知、自决策、自执行的智能化方向演进的未来图景。本研究旨在为机械制造企业提供一套兼具理论深度与实践指导价值的系统性框架，助力其实现高质量、高效率、低成本的可持续发展目标。

关键词：机械制造；工艺优化；生产效能；精益生产；人工智能

引言

当前，世界正经历大变局，新一代信息技术与制造业融合催生第四次工业革命，以智能制造为主导。机械制造业作为国家工业体系核心，发展模式正从传统向创新驱动、质量效益型转型。但许多制造企业仍受困于传统生产模式，面临生产效率低、资源浪费、质量不稳、响应慢等挑战。如今，不少企业设备数字化率高，可工艺优化率普遍偏低，这表明工艺环节是机械加工行业迈向智能制造的关键短板。因此，系统性开展机械制造工艺优化，打通从设计到制造的价值流，实现生产效能跃升，成为企业突破瓶颈、赢得竞争的关键。工艺优化是贯穿产品全生命周期、融合技术与管理的系统工程，需企业以全局视角审视流程，运用先进技术与管理理念，对现有工艺诊断、重构与创新，达成多重目标。本文将围绕此议题，梳理理论基础、剖析关键技术、构建实施路径、展望未来趋势，为机械制造企业转型升级提供方法论与实践指南。

1 机械制造工艺优化的理论基础与战略意义

1.1 传统工艺模式的困境与挑战

传统的机械制造工艺模式主要依赖于经验驱动和离散化作业，其固有的局限性在当今复杂多变的市场环境中日益凸显：（1）效率低下与资源浪费：工艺路线规划缺乏科学依据，常存在冗余工序、过长的物流路径和频繁的装夹定位。设备利用率不高，大量时间消耗在非切削的辅助活动中，导致整体生产周期冗长。（2）质量不稳定与一致性差：加工过程中的参数设定、刀具磨损补

偿、热变形控制等高度依赖操作工人的个人经验和技能水平，难以保证批量生产的产品质量稳定性和一致性，返工与废品率居高不下。（3）柔性不足与响应迟缓：面对小批量、多品种、定制化的市场需求，传统刚性生产线调整困难、切换成本高昂，无法快速响应订单变化，导致库存积压或交货延期。（4）信息孤岛与协同困难：设计、工艺、生产、质量等部门间信息传递不畅，形成数据孤岛。工艺文件更新滞后，现场执行与设计意图脱节，跨部门协同效率低下。

1.2 工艺优化的战略价值

针对上述困境，系统性的工艺优化能够为企业带来全方位的战略价值：（1）直接经济效益：通过缩短加工时间、减少物料消耗、降低废品率和返工成本，显著降低单件产品的制造成本。（2）核心竞争力提升：稳定的高质量输出和快速的市场响应能力，是企业在激烈竞争中脱颖而出的关键。优化后的工艺能更好地满足客户对产品性能和交付期的严苛要求^[1]。（3）赋能智能制造转型：工艺优化是智能制造落地的基础。只有当底层的物理制造过程被标准化、数字化、模型化后，上层的智能排产、预测性维护、自适应控制等高级应用才能有效实施。（4）促进可持续发展：优化工艺能够有效减少能源消耗和废弃物排放，符合绿色制造的理念，有助于企业履行社会责任并满足日益严格的环保法规。

2 机械制造工艺优化的关键技术体系

现代工艺优化已不再是孤立的技术改良，而是构建在一个由多项关键技术支撑的综合性体系之上。

2.1 数字化建模与仿真技术

数字化建模与仿真是工艺优化的“虚拟试验场”，它允许工程师在物理制造之前，对整个加工过程进行全面的模拟、验证与优化。（1）几何建模与CAM编程：利用CAD/CAM一体化软件，可以精确构建零件的三维数字模型，并自动生成高效、可靠的数控加工程序（NC代码）。高级CAM系统能智能规划最优刀具路径，避免碰撞，最大化材料去除率。（2）物理场仿真：通过有限元分析（FEA）等方法，可以对加工过程中的力学（切削力、应力应变）、热学（切削热、热变形）和动力学（振动、颤振）行为进行高保真度仿真。这有助于预测加工误差、优化切削参数、选择合适的工具和夹具，从而在源头上保证加工精度和表面质量^[2]。（3）虚拟机床仿真：构建机床的数字孪生体，将NC程序导入其中进行虚拟运行，可以全面验证程序的正确性、机床运动的合理性以及干涉碰撞的可能性，大幅减少昂贵的试切成本和停机时间。

2.2 精益生产（Lean Production）理念

精益生产是一种以消除一切浪费为核心思想的管理哲学，为工艺优化提供了强大的方法论支持。（1）价值流图析（VSM）：通过绘制当前状态价值流图，可以清晰地识别出生产流程中的增值活动与七种浪费（过量生产、等待、搬运、过度加工、库存、动作、缺陷），为后续的优化指明方向。（2）单元化生产（Cellular Manufacturing）：打破传统的功能布局，按照产品族将设备重新组合成紧凑的制造单元，实现单件流或小批量流生产，极大缩短物流距离和生产周期。（3）标准化作业：将最佳的作业方法、顺序、时间和安全要点固化下来，形成标准作业指导书（SOP），确保不同班次、不同人员都能稳定地输出一致的质量。（4）持续改进（Kaizen）：建立全员参与的持续改进文化，鼓励一线员工发现问题、提出改善建议，并通过PDCA循环不断优化工艺流程。

2.3 先进制造技术的融合应用

新兴的制造技术为工艺优化开辟了全新的可能性。

（1）增材制造（3D打印）：对于结构复杂、传统减材制造难以加工或需要大量装配的零件，增材制造可以直接成形，省去多道工序，实现设计自由化和轻量化，从根本上简化工艺路线。（2）复合加工技术：集车、铣、钻、磨等多种加工功能于一体的复合加工中心，可以在一次装夹中完成全部或大部分加工内容，彻底解决多次装夹带来的累积误差问题，大幅提升精度和效率。（3）智能制造装备：具备自感知、自适应能力的智能机床，

能够实时监测切削状态，自动调整加工参数以应对刀具磨损或材料变异，确保加工过程始终处于最优状态。

3 生产效能提升的系统化实施路径

3.1 诊断分析阶段

任何成功的优化都始于对现状的精准把握。在诊断分析阶段，核心任务是通过科学的方法识别出制约生产效能的真正瓶颈与痛点。这要求企业首先建立起完善的数据采集体系，利用遍布车间的传感器、制造执行系统（MES）等信息化工具，全面、实时地收集设备综合效率（OEE）、各工序的实际节拍、在制品库存水平、质量合格率等关键运营数据^[3]。在此数据基础上，再辅以价值流图析（VSM）、时间观测（Time Study）等精益工具，对现有的整个工艺流程进行一次系统性的“体检”。通过绘制当前状态价值流图，可以直观地量化出流程中各项增值与非增值活动所占用的时间和资源，从而精准地定位出浪费最严重的环节，并据此确定后续优化工作的优先级和突破口。

3.2 方案设计与规划阶段

在明确了问题所在之后，便进入方案设计与规划阶段，其核心在于将诊断结果转化为具体、可行的行动计划。首先，必须设定清晰、具体且可衡量的优化目标，例如“将某关键壳体零件的精加工周期从45分钟缩短至36分钟”或“将某装配线的一次交验合格率从97%提升至99.5%”。这些目标将成为后续所有工作的指引和最终效果的评判标准。接着，需要根据所要解决的具体问题，审慎地选择和组合最合适的技术手段。例如，若问题是刀具路径效率低下，则应重点考虑引入高级CAM软件进行路径优化；若是车间布局导致物流不畅，则需着手进行单元化生产的重组设计。无论方案如何，都必须在正式实施前，充分利用数字化建模与仿真技术，在虚拟环境中对新方案进行充分的测试、验证和迭代。这一“虚拟先行”的策略能够有效规避物理世界中的试错风险，确保方案的可行性与预期效果，为后续的成功落地奠定坚实基础。

3.3 实施与监控阶段

方案设计完成后，关键的挑战在于将其成功地付诸实践，并建立有效的动态监控机制。这一阶段的成功与否，很大程度上取决于变革管理的有效性。企业需要投入足够的精力进行人员培训，确保一线操作人员和管理人员能够充分理解新工艺、新流程的原理和操作方法；同时，要做好充分的沟通协调工作，化解可能存在的阻力，并通过合理的激励机制调动全员的积极性，确保新的标准能够被顺利接受并严格执行^[4]。在实施过程中，必

须同步部署实时的过程监控体系，例如通过车间数据看板，对OEE、节拍达成率、质量合格率等核心指标进行不间断的跟踪。这种透明化的管理方式不仅能让管理者随时掌握项目进展，更能及时发现执行过程中的偏差和异常，并迅速采取纠正措施，确保优化项目始终沿着正确的轨道前进。

3.4 效果评估与持续改进阶段

当优化方案稳定运行一段时间后，便需要进入效果评估与持续改进阶段，这是形成闭环管理、实现螺旋式上升的关键。评估工作必须基于一套预先设定的、科学的关键绩效指标（KPI）体系来进行，这套体系应全面覆盖生产效率（如OEE、人均产出、生产周期）、质量成本（如一次交验合格率、废品率、返工成本）以及资源利用（如原材料利用率、能源单耗）等多个维度，以客观、量化的方式衡量优化成果是否达到了预期目标。对于被证明行之有效的优化举措，应及时将其固化为新的企业标准作业程序（SOP），并在组织内部进行知识沉淀和经验分享，以便在其他相似的产线或产品上推广应用。最后，整个优化过程不应被视为一个终点，而是一个新的起点。应将本次评估的结果、过程中发现的新问题以及积累的经验教训，全部纳入下一轮改进的输入，再次启动PDCA循环，从而推动企业的工艺水平和生产效率实现持续、稳定的提升。

4 机械制造工艺优化的未来趋势展望

4.1 人工智能（AI）驱动的自主优化

未来的工艺优化将不再是工程师主导的被动响应，而是由AI驱动的主动探索。机器学习算法能够从海量的历史加工数据中挖掘出隐含的规律，自动推荐最优的工艺参数组合。深度强化学习甚至可以让系统在虚拟环境中进行无数次“试错”，自主找到全局最优的加工策略，实现“无人干预”的工艺自优化。

4.2 数字孪生（Digital Twin）赋能的全生命周期管理

数字孪生技术将为工艺优化提供一个贯穿产品全生命周期的、动态演进的虚拟空间。从产品设计、工艺规划、虚拟验证，到物理世界的生产执行、实时监控，再

到产品服役后的状态反馈，所有数据都将在这个“镜像宇宙”中汇聚、融合、分析。工程师可以在数字孪生体上进行“假设分析”（What-if Analysis），预测不同工艺变更对最终产品性能的影响，实现真正意义上的“先知先行”。

4.3 云边协同的分布式智能

未来的制造系统将形成“云-边-端”协同的智能架构。边缘计算节点负责处理设备层的实时数据，进行快速响应；云端则汇聚全局数据，利用强大的算力进行复杂的模型训练和大规模优化。这种架构既能保证控制的实时性，又能发挥云计算的智能优势，使工艺优化能力无处不在。

5 结语

机械制造工艺优化是一项复杂而系统的工程，是连接技术创新与商业价值的关键桥梁。在智能制造的时代浪潮下，企业必须摒弃零敲碎打的改良思维，转而拥抱以数字化、精益化、智能化为核心的系统性优化范式。通过构建“诊断-设计-实施-评估”的闭环路径，并积极融合AI、数字孪生等前沿技术，企业不仅能有效破解当前的生产效能瓶颈，更能为未来的可持续发展和核心竞争力构建奠定坚实的基础。唯有如此，方能在激烈的全球竞争中立于不败之地，实现从“制造”到“智造”的华丽蜕变。

参考文献

- [1]张卫丰.先进制造技术与机械制造工艺的优化措施[J].大众标准化,2025,(14):47-49.
- [2]刘晋源,张然.机械设计制造及自动化生产线工艺优化与效率提升[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十三届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.青岛港湾职业技术学院;青岛龙嘉海事船舶设计有限公司,;2025:36-37.
- [3]黄彦龙.基于智能制造的机械制造工艺优化方法探讨[J].时代汽车,2025,(18):127-129.
- [4]杜启鑫,李博,靳凯峰,等.现代机械制造工艺的优化与应用研究[J].中国机械,2024,(15):40-43.